

Kajian Kapasitas Sambungan Tubular *Chord* Ganda DigROUT dengan Analisis Elemen Hingga

Made Suarjana

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, Indonesia
E-mail: msuarjana@itb.ac.id

Bayu Purnama A. Malida

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, Indonesia
E-mail: bayumalida@gmail.com

Abstrak

Tipe anjungan lepas pantai untuk eksplorasi minyak dan gas alam yang banyak dipakai di lepas pantai Indonesia adalah tipe jaket baja. Anjungan tipe jaket umumnya dibuat dari baja tubular. Dalam masa layannya, anjungan tipe jaket sering mengalami kerusakan pada sambungan (joint). Salah satu metode perbaikan yang disukai untuk elemen struktur anjungan adalah dengan digROUT. Dalam peraturan API RP 2A WSD dan NORSOK N-004 telah diberikan formulasi perhitungan kapasitas sambungan tubular yang diperkuat grout. Formulasi pada peraturan-peraturan ini merupakan persamaan-persamaan empiris yang perlu diperiksa dengan eksperimental di lab atau diuji dengan analisis metode elemen hingga. Pada penelitian ini dilakukan pengujian dengan metode elemen hingga. Pembahasan dibatasi pada tipe sambungan tubular dengan batang utama (chord) ganda. Dengan analisis elemen hingga akan dilihat pengaruh tebal grout, kuat grout, tebal chord dalam, dan tebal chord luar terhadap kapasitas sambungan tubular yang diperkuat digROUT. Dari hasil analisis diperoleh bahwa tebal dan kuat grout tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kapasitas sambungan tubular (tubular joint). Sedangkan tebal chord dalam dan luar keduanya memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kapasitas sambungan tubular. Dari perbandingan diperoleh hasil-hasil analisis metode elemen hingga cukup mendekati hasil-hasil berdasarkan peraturan API RP 2A WSD dan hasil persamaan API RP 2A WSD umumnya ada pada sisi konservatif kecuali pada kasus beban momen keluar bidang.

Kata kunci : Sambungan tubular, sambungan digROUT, sambungan *chord* ganda, perbaikan sambungan.

Abstract

The type of offshore platform for oil and natural gas exploration that is widely used in Indonesia is steel jacket platform. Jacket type platforms are generally made of tubular steel. During the service life, jacket type platforms often suffer damage to the joints. One preferred repair method for platform structure elements is by grouting. In the API RP 2A WSD NORSOK N-004 regulations, the formulations of tubular joint capacity reinforced by grouting are specified. The formulations in the regulations are empirical equations that need to be examined experimentally in the lab or tested by finite element analysis method. In this study, testing using the finite element method is conducted. The discussion is limited to the type of tubular joint with double skin chord. By finite element analysis, the influence of grout thickness, grout strength, inner chord thickness, and outer chord thickness to capacity of tubular joints reinforced with grout is investigated. From the analysis, it was found that the thickness and strength of the grout do not have a significant effect on increasing tubular joint capacity. While the thickness of both the inner and outer chords have a significant effect on increasing the tubular joint capacity. By comparison, the results of finite element method analysis are quite close to the results based on API regulation and in general the API results are more conservative except for cases with out-of-plane bending load.

Keywords: Tubular joint, grouted joint, double-skin joint, joint retrofit.

1. Pendahuluan

Salah satu sistem bangunan lepas pantai yang banyak digunakan dalam proses eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi dan gas yaitu anjungan lepas pantai tipe jaket (*jacket platform*). *Jacket platform* merupakan jenis bangunan lepas pantai yang cocok digunakan untuk daerah laut dangkal sampai kedalaman sedang. *Jacket platform* merupakan bangunan lepas pantai yang terdiri dari dua bagian utama yaitu struktur jaket dan

struktur dek. Struktur *deck* merupakan struktur bangunan lepas pantai yang berfungsi sebagai tempat para pekerja berkegiatan dan tempat peralatan. Sedangkan struktur jaket merupakan struktur rangka baja tubular yang berfungsi sebagai dudukan untuk struktur dek. Umumnya seluruh bagian struktur anjungan lepas pantai jaket terbuat dari baja. Struktur jaket biasanya dibuat dari baja tubular dan hubungan antar batang disambung dengan las, selanjutnya disebut sambungan tubular (*tubular joint*).

Kondisi lingkungan lautan yang ekstrim tentunya dapat menimbulkan masalah-masalah. Salah satu masalah yang sering terjadi pada struktur *jacket platform* yaitu korosi. Hal ini dikarenakan lingkungan lautan yang bersifat korosif dan juga hampir seluruh struktur penyusun anjungan terbuat dari bahan baja yang mudah terkorosi. Walaupun perlindungan korosi biasanya dipasang berupa perlindungan katodik, tetapi metode perlindungan ini hanya efektif pada area yang selalu terendam air. Daerah basah akibat gelombang dan pasang surut (*splash zone*) biasanya mengandalkan perlindungan dengan cat dan ketebalan baja lebih yang dikorbankan. Terjadinya korosi membuat permukaan elemen struktur baja akan terus terkikis sehingga akan mengurangi ketebalan dari elemen baja yang terkorosi tersebut bahkan dapat membuat elemen struktur tersebut sampai berlubang. Dengan berkurangnya ketebalan ataupun sampai berlubang elemen struktur yang terkorosi maka akan mempengaruhi kapasitas elemen struktur tersebut. Salah satu daerah yang sering mengalami korosi yaitu pada bagian sambungan tubular (*tubular joint*) struktur jaket. Jenis kerusakan yang juga sering terjadi adalah terjadinya retak akibat *fatigue* akibat terjadinya beban lingkungan yaitu angin, gelombang dan arus laut yang bervariasi besar dan arahnya sepanjang masa layan struktur. Struktur anjungan lepas pantai juga sering mengalami perubahan spesifikasi pembebanan akibat perubahan peralatan dan operasi yang terjadi pada anjungan ataupun akibat terjadinya pembaruan terhadap peraturan pembebanan seperti pembaruan terhadap beban gempa dan teori struktur tahan gempa.

Dengan terjadi kerusakan atau peningkatan pembebanan pada anjungan lepas pantai akan terjadi penurunan tingkat keamanan struktur anjungan. Jika terus dibiarkan tentunya akan berakibat fatal pada struktur anjungan lepas pantai seperti terjadinya keruntuhan sebagian atau keseluruhan struktur anjungan lepas pantai itu. Perbaikan atau perkuatan terhadap elemen-elemen struktur yang kapasitasnya sudah tidak memenuhi perlu dilakukan, seperti pada batang tubular, balok penopang dek dan sambungan antar batang termasuk sambungan tubular. Penelitian ini dibatasi pada metode perkuatan untuk sambungan tubular pada anjungan lepas pantai tipe jaket. Salah satu metode perbaikan yang dianggap paling efektif yaitu metode digROUT. Perbaikan dengan metode grout dapat mengembalikan bahkan meningkatkan kapasitas sambungan yang mengalami kerusakan. Berdasarkan metode konstruksi yang diterapkan pada struktur anjungan lepas pantai tipe jaket, ada dua pengelompokan metode grout yang bisa diterapkan, yaitu metode grout penuh (*fully grouted joint*) dan metode grout pada sambungan *chord ganda (double skin joint)*. Metode pertama diterapkan apabila batang utama sambungan (*chord*) merupakan batang tunggal sehingga grout diterapkan mengisi seluruh penampang *chord*. Metode kedua diterapkan pada sambungan ke kaki jaket yang didalamnya ada tiang pancang baja tubular. Kaki jaket dan tiang pancang membentuk *chord* yang terdiri dari dua batang tubular yang selanjutnya akan disebut *chord ganda (double skin chord)*. Grout diaplikasikan hanya mengisi ruang diantara kedua baja tubular *chord (ruang annulus)*.

Pengujian dengan metode elemen hingga terhadap metode grout penuh sudah dilaporkan pada penelitian sebelumnya (Suarjana dan Kurnia 2013). Penelitian ini dibatasi pada pengujian dengan metode elemen hingga untuk metode sambungan *chord ganda (double skin joint)*.

Beberapa penelitian sudah melakukan kajian terhadap kapasitas sambungan tubular. Salah satu pelopor pengembangan persamaan untuk kapasitas sambungan tubular adalah Yura (Yura *et. al.*, 1980; Swensson dan Yura, 1987) yang mengembangkan formulasi empiris berdasarkan hasil-hasil eksperimental. Shen dan Choo (2012) meneliti faktor konsentrasi tegangan pada sambungan tubular T digROUT penuh dengan metode elemen hingga. Gomes *et. al.* (2019) meneliti dengan cara eksperimental dan dengan metode elemen hingga kekuatan sambungan baja persegi berongga (*hollow*) yang diperkuat dengan pelat pada sisinya. Melek *et. al.* (2017) meneliti kekuatan sambungan tubular yang diperkuat dengan menambahkan baja tubular melingkari *chord* dengan metode elemen hingga. Wei (2011) melakukan penelitian untuk mempelajari perilaku batang dan sambungan tubular digROUT dengan cara eksperimental dan dengan metode elemen hingga. Untuk sambungan yang dilaporkan adalah faktor konsentrasi tegangan untuk tipe sambungan digROUT penuh. Shengzhi dan Yongbo (2011) meneliti kekuatan sambungan tubular yang diperkuat dengan penebalan baja dengan metode elemen hingga. Shubin *et. al.* (2013) meneliti kekuatan sambungan tubular yang diperkuat pelat dengan metode elemen hingga.

Dalam peraturan API RP 2A WSD (2007) dan NORSOK N-4 (2004), perhitungan kapasitas sambungan tubular yang diperkuat digROUT sangat mirip dengan untuk sambungan tubular tanpa grout. Bagian yang berbeda adalah perhitungan faktor kapasitas fungsi geometri. Untuk sambungan *chord ganda (double skin joint)*, besar kapasitas sambungan juga dipengaruhi oleh tebal batang dalam sedangkan pengaruh tebal grout dan kekuatan material grout tidak diperhitungkan.

Penelitian ini diarahkan untuk mengkaji dan menganalisis sambungan tubular yang digROUT khususnya tipe *chord ganda (double skin joint)*. Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis untuk melihat hubungan tebal batang dalam, tebal grout, kuat grout, dan tebal batang *chord* luar terhadap peningkatan kapasitas sambungan tubular. Pada penelitian ini dilakukan analisis sambungan tubular dengan metode elemen hingga menggunakan *software ABAQUS/CAE 6.10*. Analisis dengan metode elemen hingga dipilih karena relatif lebih efektif dibandingkan dengan melakukan eksperimental dan juga hasil yang diperoleh sudah cukup bagus.

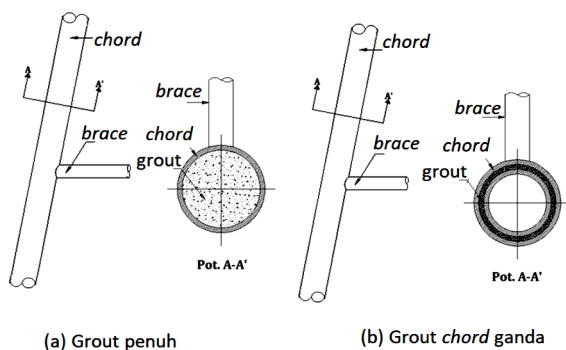
2. Sambungan Tubular DigROUT (*Grouted Tubular Joint*)

Sambungan tubular merupakan pertemuan/hubungan antara dua atau lebih batang tubular. Batang utama pada sambungan tubular disebut batang *chord*, sedangkan batang-batang lainnya yang menumpu pada

batang *chord* disebut batang *brace*. Terdapat berbagai jenis sambungan tubular berdasarkan banyaknya batang *brace* dan arahnya yang dikelompokkan dalam tiga tipe sambungan sederhana yaitu K, X, dan Y/T. Sambungan tipe T adalah sambungan tipe Y yang sudut antar batangnya 90°. Penelitian ini dibatasi pada sambungan tipe T.

Pada umumnya anjungan lepas pantai dibangun dengan baja-baja tubular yang tidak digrout termasuk pada sambungan-sambungannya. Grout diaplikasikan pada batang atau sambungan tubular sebagai suatu metode perbaikan atau perkuatan dengan cara menginjeksi material grout untuk mengisi ruang dalam batang atau sambungan. Metode memberikan grout merupakan metode yang biasa dilakukan pada anjungan lepas pantai. Hal ini dikarenakan metode grout merupakan metode yang cukup efektif mengembalikan atau meningkatkan tahanan sambungan dan juga murah serta dapat menghindari pemakaian las yang sangat berbahaya di daerah yang banyak gas dan minyak.

Terdapat dua tipe metode grout yang bisa diterapkan pada sambungan tubular, yaitu grout penuh (*fully grouted*) dan grout *chord* ganda (*double skin joint*) seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Grout penuh (*fully grouted*) merupakan grout yang diterapkan pada sambungan dengan batang *chord* merupakan batang tunggal. Sedangkan grout *chord* ganda (*double-skin grout*) merupakan grout yang diterapkan pada sambungan dengan batang *chord* terdiri dari dua batang tubular. Sistem *chord* ganda sangat umum dipakai pada kaki-kaki anjungan lepas pantai tipe jaket. Dari metode konstruksi anjungan lepas pantai tipe jaket, biasanya kaki-kaki jaket dipakai sebagai *guide* saat pemancangan pondasi tiang pancang. Dengan sistem ini kaki jaket berisi tiang pancang yang secara bersama dapat dimanfaatkan sebagai sambungan tipe *chord* ganda.



Gambar 1. Tipe-tipe sambungan tubular digrout

Pengujian dengan metode elemen hingga terhadap metode grout penuh sudah dilaporkan pada penelitian sebelumnya (Suarjana dan Kurnia 2013). Penelitian ini merupakan kelanjutan pengujian dengan metode elemen hingga untuk metode sambungan *chord* ganda (*double skin joint*).

3. Formulasi Kapasitas Sambungan Berdasarkan Peraturan

Formulasi kekuatan sambungan tidak diperkuat maupun yang diperkuat digrout sudah diatur pada Peraturan API RP 2A WSD 2007 dan NORSOK N-004 2004. Kedua peraturan ini memberikan formulasi yang berbeda tetapi sangat serupa. Untuk penelitian ini akan dibatasi perbandingan dengan Peraturan API RP 2A WSD 2007.

3.1 Kapasitas sambungan tubular berdasarkan peraturan API RP 2A WSD

Masing-masing tipe sambungan (K, X, dan Y/T) memiliki persamaan kapasitas yang berbeda. Kapasitas dari masing-masing tipe sambungan sederhana tersebut dipengaruhi oleh parameter-parameter geometri, yaitu:

- d , yaitu diameter batang *brace*.
- D , yaitu diameter batang *chord*.
- t , yaitu ketebalan batang *brace*.
- T , yaitu ketebalan batang *chord*.
- θ , yaitu sudut antara batang *brace* dengan batang *chord*
- β (rasio diameter), yaitu $\beta = (d/D)$ yang menggambarkan parameter kekompakan sambungan.
- γ (rasio ketebalan *chord*, yaitu $\gamma = (D/2T)$ yang menggambarkan kekakuan dari batang *chord*.
- τ (rasio ketebalan dinding), yaitu $\tau = (t/T)$
- α (parameter panjang *chord*), yaitu $\alpha = (2L/D)$ yang menggambarkan bahwa batang *chord* bersifat balok dalam lentur.
- g (celah atau *gap*), yaitu jarak antara dua *brace* yang disambungkan pada pertemuan dengan *chord* (untuk sambungan K)

Kapasitas dari masing-masing tipe sambungan juga dipengaruhi oleh parameter-parameter material, yaitu:

- F_y , yaitu kuat leleh material baja
- E_s , yaitu modulus elastisitas baja
- f'_c , yaitu kuat tekan grout
- e'_c , yaitu regangan batas grout

Persamaan tahanan sambungan tubular pada Peraturan API RP 2A WSD dibatasi hanya berlaku untuk sambungan yang memenuhi kriteria berikut:

- $0,2 \leq \beta \leq 1,0$
- $10 \leq \gamma \leq 50$
- $30 \leq \theta \leq 90$
- $\frac{g}{D} \geq -0,6$ (untuk sambungan K)

3.2 Formulasi kapasitas dasar

Perumusan kapasitas sambungan menurut peraturan API RP 2A WSD ditunjukkan pada **Persamaan 1** dan **2**.

$$P_a = \frac{F_y T^2}{SF \sin \theta} Q_u Q_f \quad (1)$$

$$M_a = \frac{F_y T^2 d}{5F \sin \theta} Q_u Q_f \quad (2)$$

Keterangan :

P_a : Kapasitas aksial ijin *sambungan*

M_a : Kapasitas momen ijin *sambungan*

Q_u : Faktor kekuatan fungsi geometri sambungan

Q_f : Faktor kekuatan fungsi tegangan pada batang *chord*

SF : Angka keamana (*Safety Factor*) = 1,6

3.3 Faktor kekuatan fungsi geometri (Q_u)

Faktor kekuatan fungsi geometri (Q_u) suatu *sambungan* bergantung dari tipe dan dimensi *sambungan*. Formulasi Q_u untuk masing-masing tipe *sambungan* diberikan pada **Tabel 1**.

Keterangan :

a. Q_β merupakan faktor dimensi yang didefinisikan sebagai berikut :

$$Q_\beta = \frac{0,3}{\beta(1 - 0,833\beta)} \quad \text{untuk } \beta > 0,6$$

$$Q_\beta = 1,0 \quad \text{untuk } \beta \leq 0,6$$

b. Q_g merupakan faktor jarak (gap) yang didefinisikan sebagai berikut :

$$Q_g = 1 + 0,2 \left[1 - 2,8 \frac{g}{D} \right]^3 \quad \text{untuk } \frac{g}{D} \geq 0,5 \text{ tetapi } Q_g \geq 1,0$$

$$Q_g = 0,13 + 0,65\phi\gamma^{0,5} \quad \text{untuk } \frac{g}{D} \leq -0,5$$

Dimana, $\phi = \frac{r_{Fy,b}}{r_{Fy,c}}$

Jika $-0,5 \leq \frac{g}{D} \leq 0,5$ maka nilai Q_g harus diinterpolasi

3.4 Faktor kekuatan fungsi beban *chord* (Q_f)

Q_f adalah faktor yang memperhitungkan pengaruh beban dan kapasitas *chord* dalam memikul beban sebagai batang. Untuk penelitian ini dibatasi kasus beban pada *chord* tidak cukup besar untuk mempengaruhi kekuatan sambungan sehingga diambil $Q_f = 1,0$. Nilai kapasitas sambungan akan dibandingkan dengan hasil analisis metode elemen hingga dengan *chord* tidak dibebani selain dari batang *brace*.

3.5 Formulasi untuk sambungan digROUT

Dalam peraturan API RP 2A WSD 2007, formulasi kapasitas sambungan digROUT diberikan dengan nilai Q_u yang dimodifikasi. Berdasarkan API RP 2A WSD, untuk sambungan digROUT penuh maupun kondisi *chord* ganda, nilai Q_u ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2 tidak memberikan faktor kapasitas fungsi geometri (Q_u) untuk kapasitas tekan. Hal ini dikarenakan sambungan digROUT, terutama tipe grout penuh, sangat kuat menahan gaya tekan sehingga kapasitas sambungan digROUT untuk kondisi aksial tekan biasanya lebih besar dari kapasitas batang *brace*. Dengan kata lain, batang *brace* lebih dahulu mengalami kegagalan dibandingkan sambungan.

Persamaan pada **Tabel 2** dapat dipakai untuk sambungan grout penuh maupun sambungan *chord* ganda. Tetapi, khusus untuk sambungan *chord* ganda kegagalan bisa juga terjadi akibat deformasi *chord* (*ovalization*). Kapasitas sambungan *chord* ganda terhadap *ovalization* dapat diperkirakan dengan persamaan sambungan tanpa grout pada **Tabel 1** dengan mengganti ketebalan batang *chord* (T) dengan ketebalan efektif (T_e) sesuai **Persamaan 3**.

$$T_e = \sqrt{T^2 + T_p^2} \quad (3)$$

Keterangan:

T_e : Ketebalan efektif batang *chord* ganda

T : Ketebalan batang *chord* luar (kaki jaket)

T_p : Ketebalan batang *chord* dalam (tiang pancang)

4. Model Elemen Hingga

Metode elemen hingga (MEH) adalah salah satu metode yang bisa memberikan hasil yang akurat bergantung pada pemodelan objek/permasalahannya. Pada bagian ini dipresentasikan pemilihan elemen dan pembuatan jaring-jaring (*mesh*) dan kriteria kapasitas yang diterapkan dalam analisis.

Tabel 2. Nilai Q_u sambungan digROUT berdasarkan API

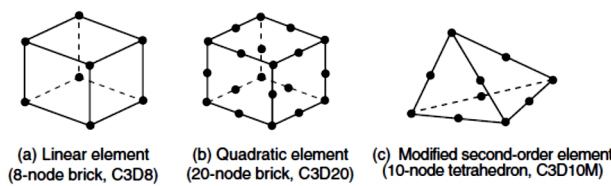
Jenis Sambungan	Aksial tarik	Momen sebidang	Momen keluar bidang
Y/K/X	$1,25 \beta \gamma \left(1 + \frac{1}{\sin \theta} \right)$	$1,5 \beta \gamma$	$1,5 \beta \gamma$

Tabel 1. Faktor kekuatan fungsi geometri (Q_u) berdasarkan API RP 2A WSD

Jenis Sambungan	Aksial tarik	Aksial tekan	Momen sebidang	Momen keluar bidang
K	$(1,6 + 1,2\gamma)\beta^{1,2} Q_u \leq 40\beta^{1,2} Q_u$			
Y/T	30β	$2,8 + (20 + 0,8\gamma)\beta^{1,6}$ $\leq 2,8 + 36\beta^{1,6}$	$(5 + 0,7\gamma)\beta^{1,2}$	$2,5 + (4,5 + 0,2\gamma)\beta^{2,4}$
X	23β for $\beta \leq 0,9$ $20,7 + (\beta - 0,9)(17\gamma - 220)$ for $\beta > 0,9$	$[2,8 + (12 + 0,1\gamma)\beta] Q_\beta$		

4.1 Tipe elemen dan model tipikal sambungan tubular

Model elemen hingga untuk sambungan tubular dapat dibentuk dengan elemen solid atau elemen cangkang. Dalam penelitian ini digunakan elemen solid delapan titik dan *software* ABAQUS (2011). Menurut Swensson dan Yura (1987) menggunakan elemen solid dan elemen cangkang memberikan hasil yang tidak jauh berbeda untuk analisis sambungan tubular. Dalam penelitian ini dipilih elemen tipe solid karena lebih mudah dalam pemodelan dan visualisasi elemen yang terdiri dari beberapa lapis material yang berbeda. Untuk elemen *solid*, pada *software* ABAQUS ada tiga tipe elemen yang umum digunakan yaitu jenis C3D8I (*Hex Linear Incompatible Modes*), C3D20R (*Hex Quadratic 20 solid elements Reduced Integration*), dan C3D10M seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**.

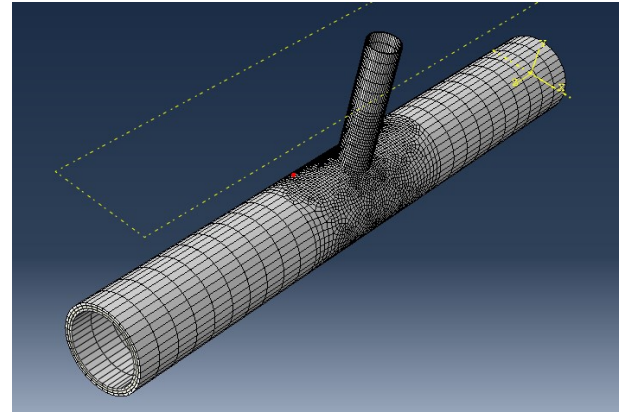


Gambar 2. Jenis-jenis elemen solid ABAQUS
(sumber: ABAQUS 2011)

Van DerVegte et al (2002) menggunakan jenis elemen *meshing* C3D20R dalam pemodelan sambungan tubular untuk memperhitungkan pengaruh pembebanan awal pada batang *chord*. Sedangkan Shubin et al (2013) menggunakan jenis C3D8I untuk pemodelan sambungan tubular dengan pengaku. Untuk penelitian ini digunakan elemen C3D8I. Dalam ABAQUS (2011) telah dijelaskan bahwa C3D8I merupakan model perbaikan dari jenis C3D8. Dimana C3D8I ini memiliki kualitas yang jauh lebih baik dari C3D8. Oleh karena itu, menggunakan elemen C3D8I sering digunakan untuk pemodelan khususnya sambungan tubular. Hal ini dikarenakan, elemen C3D8I paling sesuai memodelkan kontak dan memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dengan beban komputer (*CPU time*) yang relatif rendah.

Selain penggunaan tipe elemen dalam pemodelan, pembagian elemen (*meshing*) juga perlu sangat mempengaruhi akurasi hasil metode elemen hingga. Pada dasarnya pembentukan jaring-jaring (*mesh*) pada daerah dengan gradien tegangan yang besar harus lebih rapat. Khusus sambungan tubular, gradien tegangan terbesar terjadi pada daerah pertemuan antara batang *brace* dengan batang *chord* sehingga pembagian elemen pada daerah tersebut harus lebih rapat.

Contoh jaring-jaring elemen hingga untuk analisis sambungan tubular yang dipakai dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3**. Pertemuan antara elemen baja digROUT dimodelkan sebagai elemen kontak yang hanya efektif menyalurkan tegangan tekan. Apabila pada daerah pertemuan elemen baja dan grout terjadi kecenderungan tegangan tarik, maka akan timbul celah (*gap*) antara kedua jenis material.



Gambar 3. Jaring-jaring elemen hingga sambungan tubular

4.2 Penentuan kegagalan sambungan tubular

Untuk menentukan kegagalan suatu sambungan tubular harus ditentukan suatu parameter batas. Dalam penelitian ini digunakan suatu batas deformasi untuk menentukan kapasitas sambungan tubular. Batas deformasi yang digunakan yaitu *Yura Deformation Limit* (Swensson dan Yura 1987, Pecknold et. al. 2001). Batas deformasi Yura ini memberikan batasan perpindahan dan rotasi yang terjadi pada join tunggal seperti join T dan join Y. Batas deformasi Yura (*Yura deformation limit*) ditunjukkan pada **Persamaan 4** dan **5**.

$$\text{Batas perpindahan Yura, yaitu } \Delta_{Yura} = \frac{60dF_y}{E_s}$$

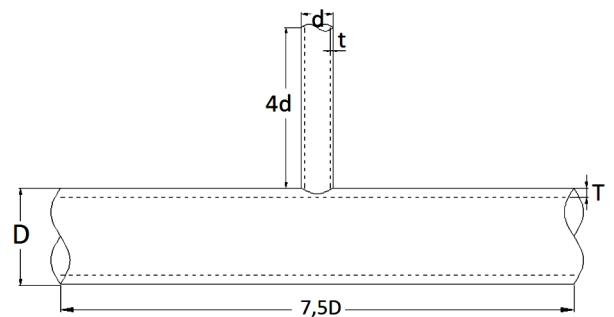
$$\text{Batas rotasi Yura, yaitu } \phi_{Yura} = \frac{80F_y}{E_s}$$

5. Studi Kasus

5.1 Deskripsi model

Dalam penelitian ini akan ditinjau sambungan tubular untuk berbagai variasi yang dimodelkan dengan konfigurasi seperti ditunjukkan **Gambar 4**.

Untuk melihat hubungan antara ketebalan grout dan kekuatan grout terhadap kapasitas sambungan tubular maka dibuat beberapa model sambungan tubular dengan variasi ketebalan grout dan variasi kekuatan



Gambar 4. Konfigurasi dan dimensi sambungan tubular

grout. Selain itu, pada penelitian ini juga dimodelkan beberapa sambungan tubular dengan variasi ketebalan batang *chord* luar dan variasi ketebalan batang *chord* dalam. Masing-masing dibuat 3 variasi model untuk melihat perbandingan peningkatan kapasitasnya sehingga total model sambungan tubular yaitu 12 model. Rangkuman model sambungan tubular yang dimodelkan ditunjukkan pada **Tabel 3**. Pada **Tabel 3**, angka merah menunjukkan variabel yang divariasikan untuk setiap kelompok. Untuk semua model dilakukan analisis digROUT dan tanpa grout. Apabila suatu model dianalisis untuk kondisi tanpa grout, model grout dan *chord* dalam tidak diaktifkan.

5.2 Model material

Dalam studi kasus ini digunakan dua jenis material yaitu material baja dan material grout. Untuk semua model, material baja yang dipakai pada kondisi elastisnya mempunyai modulus elastisitas $E = 200000$ MPa, Poisson rasio $\nu = 0,3$ dan tegangan leleh $F_y = 320$ MPa. Pada kondisi plastis dipakai model dengan *strain hardening* dan regangan putus 20%. Hubungan tegangan dan regangan baja pada kondisi plastis ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Untuk material grout dimodelkan tiga variasi kekuatan yaitu $f_c' = 41,5$ MPa, $f_c' = 62,25$ MPa, dan $f_c' = 83$ MPa. Untuk membuat kurva tegangan regangan grout digunakan model yang diusulkan oleh Thorenfeldt *et. al.* (1987). Menurut model ini hubungan tegangan (f_c)

dan regangan (ϵ) ditunjukkan pada **Persamaan 5**. Hasil plot model ini untuk tiga macam kekuatan grout ditunjukkan pada **Gambar 6**.

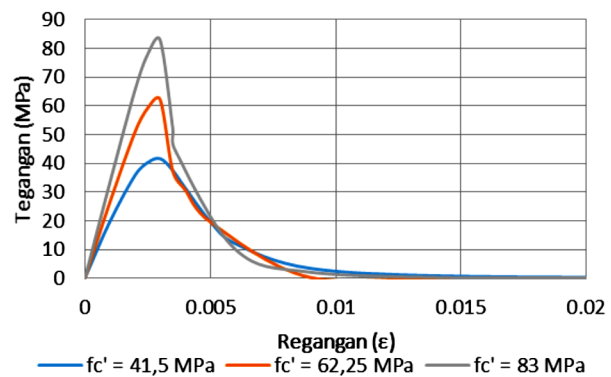
$$\frac{f_c}{f_c'} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} \frac{n}{n - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'}\right)^{nk}} \tag{5}$$

dimana,

$$k = 1 \text{ untuk } \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} \leq 1$$

$$k = 0,67 + \frac{f_c'}{62} \text{ untuk } \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} > 1$$

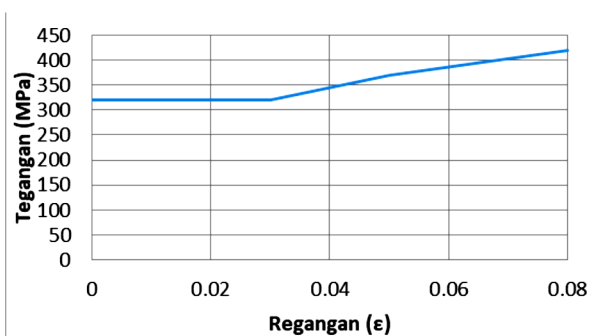
$$n = 0,4 \times 10^{-3} f_c' (\text{psi}) + 1,0$$



Gambar 6. Kurva tegangan regangan grout

Tabel 3. Deskripsi model sambungan tubular

Model	Chord luar		Brace		Chord dalam		Tebal grout	Kuat grout	
	D [mm]	T [mm]	d [mm]	t [mm]	D _p [mm]	T _p [mm]	t _g [mm]	f _c ' [MPa]	
A	1	900	25	350	10	825	25	12,5	41,5
	2	900	25	350	10	800	25	25	41,5
	3	900	25	350	10	750	25	50	41,5
B	1	900	25	350	10	800	25	25	41,5
	2	900	25	350	10	800	25	25	62,25
	3	900	25	350	10	800	25	25	83
C	1	900	25	350	10	800	12,5	25	41,5
	2	900	25	350	10	800	25	25	41,5
	3	900	25	350	10	800	50	25	41,5
D	1	875	12,5	350	10	800	25	25	41,5
	2	900	25	350	10	800	25	25	41,5
	3	950	50	350	10	800	25	25	41,5



Gambar 5. Kurva tegangan regangan plastis baja

Model klasik plastisitas von Mises dipergunakan untuk baja. Model menerapkan permukaan leleh von Mises yang diasosiasikan dengan aliran plastik untuk leleh isotropis dan hardening. Formulasi detail model ini dapat dilihat antara lain pada manual ABAQUS (ABAQUS 2011) dan Wei (2011).

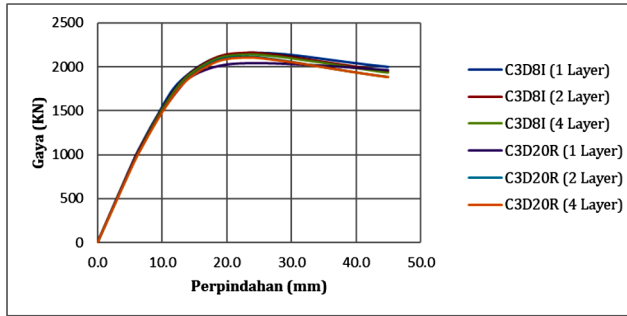
Model untuk grout ditentukan dengan menerapkan kurva uni-aksial pada **Gambar 6** ke model material *concrete damaged plasticity* pada perangkat lunak ABAQUS. Model *concrete damaged plasticity* memberikan kemampuan umum untuk pemodelan beton dan material quasi-getas lain pada struktur. Detail dan dasar teori model material ini dapat dilihat antara lain pada manual ABAQUS (ABAQUS 2011) dan Wei (2011).

5.3 Verifikasi tipe elemen hingga

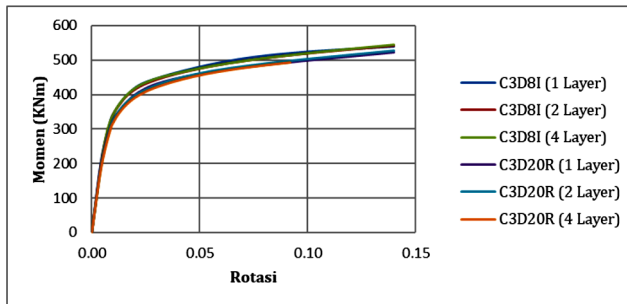
Untuk memastikan model elemen hingga yang dipakai sudah memberikan akurasi yang memadai, dilakukan verifikasi jumlah lapisan elemen dan tipe elemen. Verifikasi yang dilakukan adalah untuk mempelajari jenis elemen dan *meshing* yang efisien untuk mendapatkan konvergensi hasil dengan usaha komputasi minimal. Dua jenis elemen yang disediakan ABAQUS dibandingkan, yaitu elemen C3D8I dan C3D20R. Jumlah lapis elemen untuk diskritisasi baja dan grout juga dibandingkan dengan memvariasikan jumlah lapisan elemen dari 1 lapis, 2 lapis sampai dengan 4 lapis. Verifikasi banyaknya lapisan elemen

pada *meshing* ketebalan baja dan grout dilakukan mengingat terjadinya gaya dalam momen, sementara yang dipakai adalah elemen 3D *brick*, bukan cangkang (*shell*). Verifikasi dengan membandingkan terhadap hasil *experimental* tidak dilakukan karena keterbatasan lingkup studi dan juga keterbatasan data yang tersedia. Hasil perbandingan pada verifikasi ini untuk kapasitas tekan dan momen sebidang ditunjukkan pada **Gambar 7** dan **8**.

Dari kurva-kurva pada **Gambar 7** dan **8** dapat dilihat bahwa kapasitas dan kurva kapasitas dengan dua tipe



Gambar 7. Perbandingan kurva gaya tekan fungsi perpindahan untuk beberapa tipe jaring-jaring elemen hingga



Gambar 8. Perbandingan kurva momen fungsi rotasi untuk beberapa tipe jaring-jaring elemen hingga

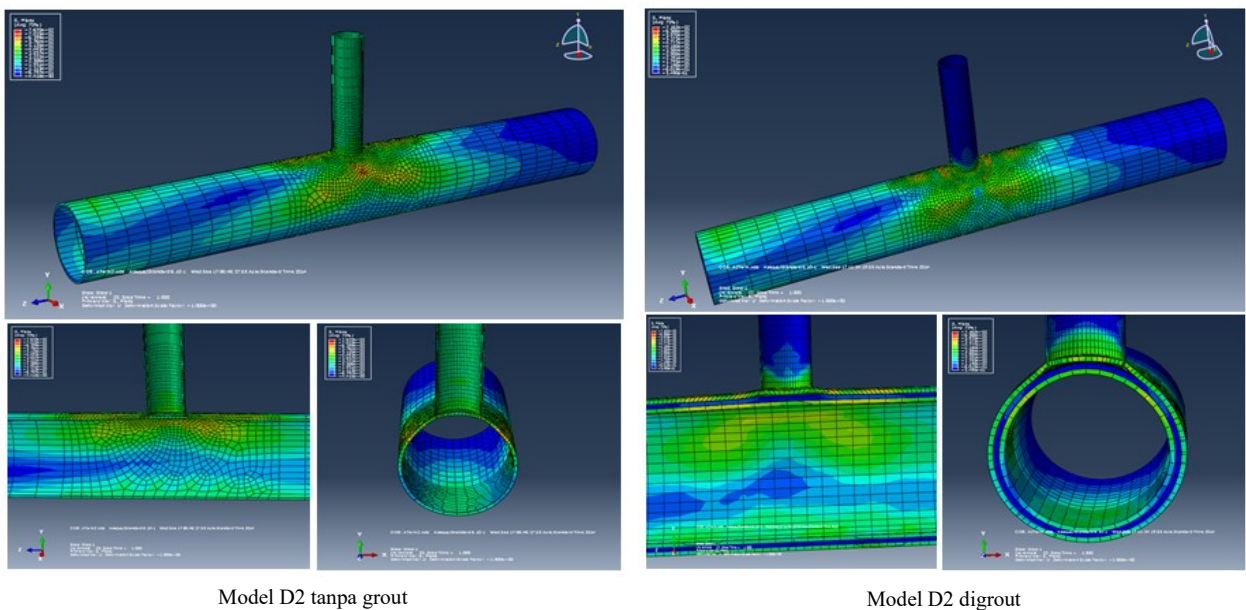
elemen dan jumlah lapisan yang berbeda memberikan hasil yang tidak jauh berbeda. Dengan membandingkan kapasitas untuk model dengan layer dan tipe elemen *meshing* yang berbeda diperoleh rata-rata persen selisih sekitar 2%. Dengan demikian dapat disimpulkan penggunaan elemen *meshing* tipe C3D8I dengan 1(satu) lapisan adalah yang terbaik karena sudah memberikan hasil yang cukup akurat dengan *running time* yang minimal.

5.4 Distribusi tegangan dan kurva kapasitas hasil analisis metode eElemen hingga

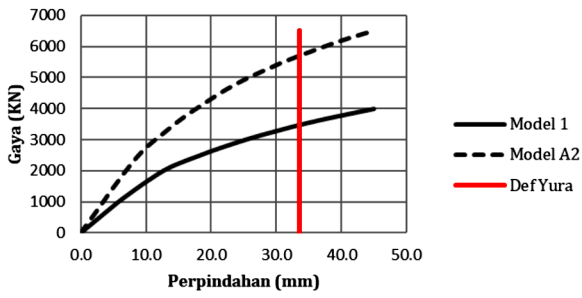
Berikut ini ditunjukkan distribusi tegangan dan kurva gaya/momen sebagai fungsi perpindahan/rotasi untuk satu contoh kasus pada setiap tipe pembebanan. Untuk modelnya dipilih model D2 dan dibandingkan antara kondisi tanpa grout dan digrout. Distribusi tegangan ditunjukkan dengan warna-warna berbeda. Bagian yang berwarna merah mengalami tegangan maksimum. Warna kuning, hijau dan biru, secara berurutan menunjukkan tegangan yang semakin kecil. Pada batas kekuatan, bagian yang berwarna merah sudah mencapai tegangan leleh.

Pada setiap model pembebanan, struktur mengalami tegangan sampai pada batas leleh tarik maupun tekan. Tegangan leleh ini tersebar pada daerah-daerah dengan tegangan maksimum, tetapi regangan belum mencapai regangan putus. Batas kekuatan dinyatakan tercapai apabila deformasi (perpindahan atau rotasi) telah mencapai batasan yang ditentukan dengan batasan Yura (**Persamaan 4 dan 5**).

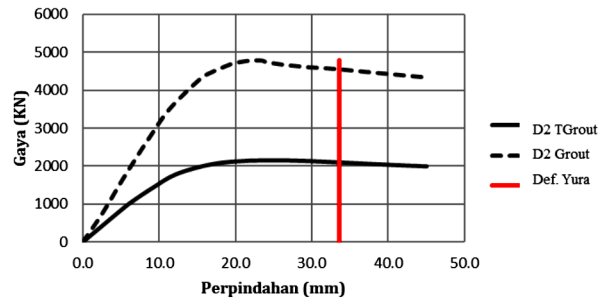
Leleh yang terjadi pada titik-titik dengan konsentrasi tegangan tinggi menyebabkan kurva beban vs deformasi melengkung dan menjadi semakin landai bersamaan dengan makin banyaknya elemen yang mengalami leleh. Konsentrasi tegangan tidak



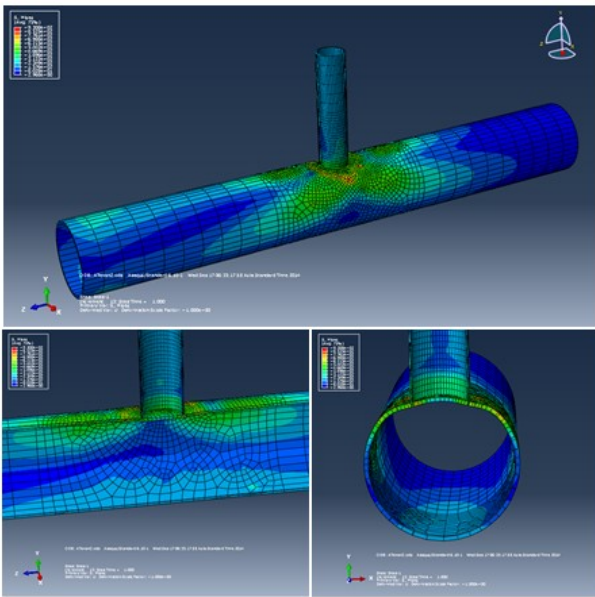
Gambar 9. Distribusi tegangan dan deformasi akibat gaya aksial tarik untuk Model D2 tanpa grout dan Model D2 digrout



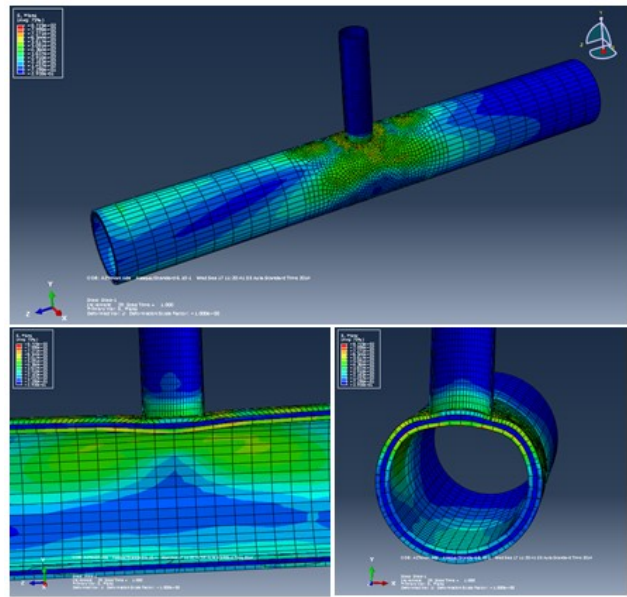
Gambar 10. Kapasitas tarik untuk Model D2 tanpa grout dan Model D2 digrout



Gambar 12. Kapasitas tekan untuk model D2 tanpa grout dan model D2 digrout

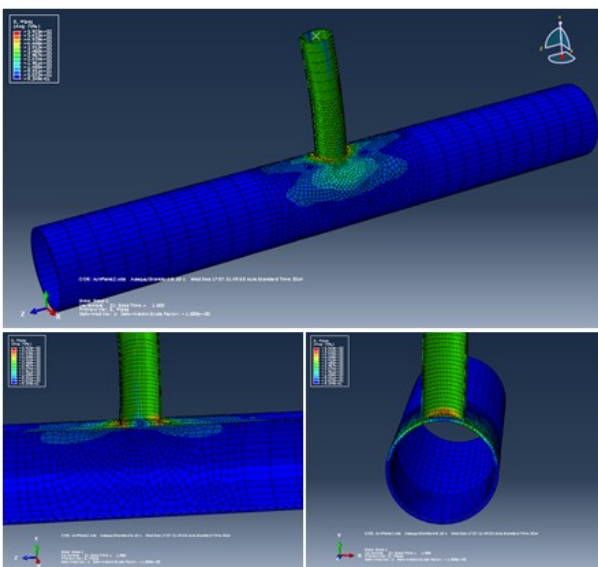


Model D2 tanpa grout

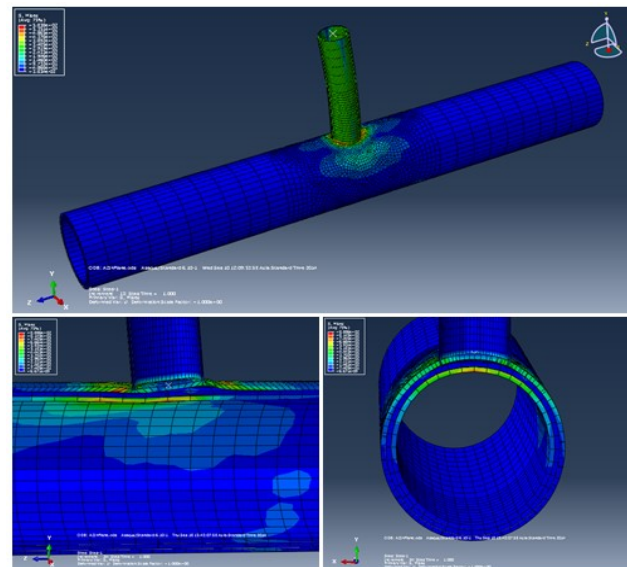


Model D2 digrout

Gambar 11. Distribusi tegangan dan deformasi akibat gaya aksial tekan untuk model D2 tanpa grout dan model D2 digrout

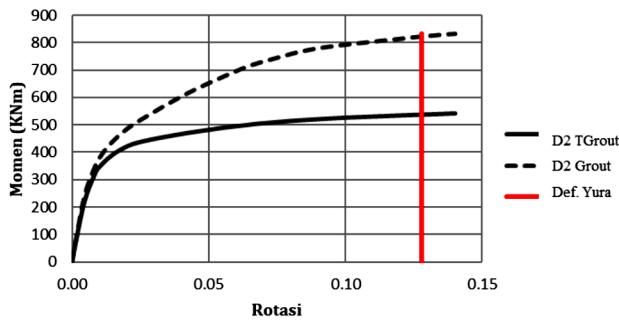


Model D2 tanpa grout

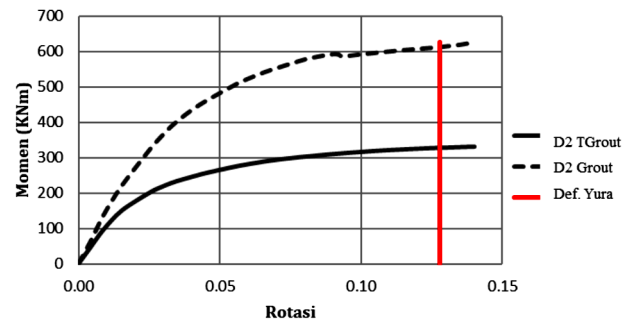


Model D2 digrout

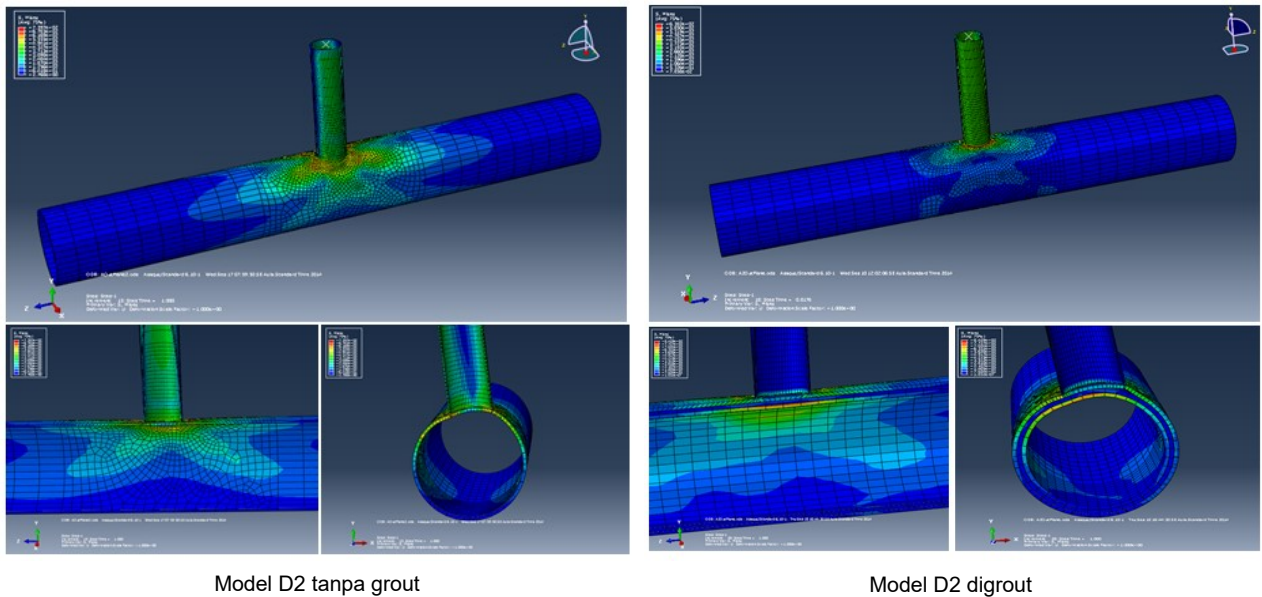
Gambar 13. Distribusi tegangan dan deformasi akibat momen sebidang untuk Model D2 tanpa grout dan Model D2 digrout



Gambar 14. Kapasitas momen sebidang untuk Model D2 tanpa grout dan Model D2 digrout



Gambar 16. Kapasitas momen keluar bidang untuk Model D2 tanpa grout dan Model D2 digrout



Gambar 15. Distribusi tegangan dan deformasi akibat momen keluar bidang untuk Model D2 tanpa grout dan Model D2 digrout

menimbulkan kegagalan prematur karena sifat duktail material baja.

Secara umum dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan kapasitas sambungan tubular cukup besar akibat grout. Untuk *chord* ganda material grout mengisi ruang yang berada di antara *chord* luar dan *chord* dalam yang disebut ruang *annulus*. Material grout yang mengisi ruang *annulus* membuat *chord* luar dan dalam bekerja bersama. Dengan demikian kekakuan dan kekuatan selimut *chord* meningkat sehingga kapasitas sambungan meningkat pula. Hal ini karena kapasitas sambungan tubular sangat bergantung kepada kekuatan dan kekakuan selimut *chord*.

5.4.1 Beban aksial tarik

Distribusi tegangan akibat beban aksial tarik pada batang *brace* ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil untuk model tanpa grout dan digrout ditunjukkan bersebelahan pada Gambar 9. Kurva gaya aksial sebagai fungsi perpindahan ditunjukkan pada Gambar 10. Kurva untuk kondisi dengan dan tanpa grout dibandingkan pada satu gambar. Garis vertikal menunjukkan batas deformasi Yura yang dipakai sebagai batas kegagalan sambungan

(Swensson dan Yura, 1987). Deformasi yang terjadi menunjukkan timbulnya celah (*gap*) antara *chord* luar digrout sehingga kapasitas sambungan ditentukan oleh kekuatan *punching shear chord* luar. Fungsi grout dalam hal ini adalah meningkatkan ketahanan sambungan menahan deformasi oval (*ovalization*) sehingga kapasitas sambungan akan meningkat akibat grout apabila *ovalization* merupakan kegagalan kritis dan bukan *punching shear*.

5.4.2 Beban aksial tekan

Distribusi tegangan akibat beban aksial tekan pada batang *brace* ditunjukkan pada Gambar 11. Hasil untuk model tanpa grout dan digrout ditunjukkan bersebelahan pada Gambar 11. Kurva gaya aksial sebagai fungsi perpindahan ditunjukkan pada Gambar 12. Kurva untuk kondisi dengan dan tanpa grout dibandingkan pada satu gambar. Garis vertikal menunjukkan batas deformasi Yura yang dipakai sebagai batas kegagalan sambungan (Swensson dan Yura, 1987). Akibat beban aksial tekan tegangan yang terjadi pada daerah sambungan adalah tegangan tekan sehingga tidak ada masalah terbentuknya celah (*gap*) antara baja digrout. Dengan kondisi ini *chord* luar,

grout dan *chord* dalam bekerja sama menahan beban sehingga kapasitas sambungan naik drastis. Peningkatan kapasitas sambungan dibatasi juga oleh kemungkinan *ovalization*, berbeda digrout penuh yang mengubah *chord* menjadi lingkaran solid.

5.4.3 Beban momen sebidang

Distribusi tegangan akibat beban momen sebidang pada batang *brace* ditunjukkan pada **Gambar 13**. Hasil untuk model tanpa grout dan digrout ditunjukkan bersebelahan pada **Gambar 13**. Kurva momen sebidang sebagai fungsi rotasi ditunjukkan pada **Gambar 14**. Kurva untuk kondisi dengan dan tanpa grout dibandingkan pada satu gambar. Garis vertikal menunjukkan batas deformasi Yura yang dipakai sebagai batas kegagalan sambungan (Swensson dan Yura, 1987). Beban momen menimbulkan kondisi tegangan tarik dan tekan sehingga sebagian dari sambungan akan mengalami masalah timbulnya celah (*gap*) antar baja digrout seperti terjadi pada beban aksial tarik. Tetapi sisi seberangnya akan mengalami kondisi ideal seperti pada pembebanan aksial tekan dengan *chord* luar dan dalam bersama grout bekerja sebagai satu kesatuan.

5.4.4 Beban momen keluar bidang

Distribusi tegangan akibat beban momen keluar bidang pada batang *brace* ditunjukkan pada **Gambar 15**. Hasil untuk model tanpa grout dan digrout ditunjukkan bersebelahan pada **Gambar 15**. Kurva momen keluar

bidang sebagai fungsi rotasi ditunjukkan pada **Gambar 16**. Kurva untuk kondisi dengan dan tanpa grout dibandingkan pada satu gambar. Garis vertikal menunjukkan batas deformasi Yura yang dipakai sebagai batas kegagalan sambungan (Swensson dan Yura, 1987). Akibat momen keluar bidang masalah terjadinya celah (*gap*) akan serupa dengan kondisi momen sebidang. Tetapi **Gambar 15** menunjukkan beban keluar bidang lebih rentan terhadap deformasi yang meninggalkan bentuk ideal lingkaran. Hal ini sangat mungkin menyebabkan kapasitas menahan momen keluar bidang tidak akan sebaik kapasitas menahan momen sebidang.

5.5 Perbandingan hasil metode elemen hingga dengan formulasi API

Hasil analisis elemen hingga dengan *software* ABAQUS/CAE 6.10 berupa kurva kapasitas vs deformasi (gaya aksial vs perpindahan dan momen vs rotasi). Dari kurva tersebut kemudian ditentukan kapasitas sambungan dengan membatasi deformasinya. Berikut rangkuman kapasitas hasil analisis elemen hingga untuk sambungan tubular tanpa grout dan digrout dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan formulasi API RP 2A WSD. Karena hasil analisis elemen hingga masih tanpa faktor keamanan, hasil-hasil dengan formulasi API RP 2A WSD juga dipresentasikan dengan angka keamanan 1,0 ($SF = 1,0$).

Pada **Tabel 4** dipresentasikan hasil-hasil analisis dengan metode elemen hingga (MEH) dan dengan

Tabel 4. Kapasitas sambungan tubular tanpa grout hasil analisis elemen hingga dan formulasi API RP 2A WSD

Model	Aksial Tarik [kN]		Aksial Tekan [kN]		Momen Sebidang [kNm]		Momen Keluar Bidang [kNm]	
	MEH	API	MEH	API	MEH	API	MEH	API
D1	1207	600	648	556	196	172	98	62
D2	3485	2333	2156	2078	535	397	329	224
D3	8843	8842	6400	6708	1322	984	1039	833
Selisih rata-rata	28%		7,5%		21%		29%	

Tabel 5. Kapasitas sambungan tubular digrout hasil analisis elemen hingga dan formulasi API RP 2A WSD

Model	Aksial Tarik [kN]		Aksial Tekan [kN]		Momen Sebidang [kNm]		Momen Keluar Bidang kNm]	
	MEH	API	MEH	API	MEH	API	MEH	API
A1	5609	3500	4504	3784	804	735	598	735
A2	5705	3500	4784	3784	823	735	611	735
A3	5966	3500	5058	3784	856	735	681	735
B1	5705	3500	4784	3784	823	735	611	735
B2	5758	3500	4899	3784	861	735	627	735
B3	5804	3500	5019	3784	876	735	661	735
C1	4259	2917	3292	2514	694	735	453	735
C2	5705	3500	4784	3784	823	735	611	735
C3	6395	3500	8471	8634	909	735	851	735
D1	3188	1750	3169	2514	473	368	383	368
D2	5705	3500	4783	3784	823	735	611	735
D3	10829	8842	9108	8634	1544	1470	1255	1470
Selisih rata-rata	37%		18%		11%		17%	

formulasi API RP 2A WSD untuk kasus sambungan tanpa grout. Untuk kasus tanpa grout dipilih kelompok Model D karena kelompok ini merepresentasikan variasi pada variabel batang *chord* luar. Batang *chord* dalam dan material grout tidak diaktifkan pada analisis ini. Dari perbandingan hasil analisis metode elemen hingga dengan formulasi API RP 2A WSD terlihat bahwa hasilnya cukup dekat dengan selisih rata-rata lebih kecil dari 30%. Pada umumnya hasil formulasi API RP 2A WSD lebih kecil atau pada sisi konservatif, kecuali pada kasus Model D3 untuk gaya aksial tekan. Pada kasus ini hasil dari formulasi API RP 2A lebih besar dari hasil analisis metode elemen hingga. Setelah diperiksa, ternyata Model D3 memang berada sedikit diluar batas validitas formulasi API RP 2A. Untuk Model D3 nilai rasio antara jari-jari batang *chord* ($D/2$) dengan ketebalan batang *chord* (T); $\gamma = 9,5$, sedikit diluar batas validitas formulasi yaitu $10 \leq \gamma \leq 50$. Hal ini menjadi peringatan bahwa batas validitas yang ditentukan pada suatu formulasi harus selalu dipenuhi.

Pada **Tabel 5** dipresentasikan hasil-hasil analisis dengan metode elemen hingga (MEH) dan dengan formulasi API RP 2A WSD untuk kasus sambungan tanpa grout. Dari perbandingan hasil analisis metode elemen hingga dengan formulasi API RP 2A WSD terlihat bahwa hasilnya cukup dekat dengan selisih rata-rata lebih kecil dari 20%, kecuali pada pengaruh aksial tarik yang mempunyai selisih rata-rata mendekati 40%. Terlihat API RP 2A WSD lebih konservatif untuk formulasi akibat beban aksial tarik. Pada umumnya hasil formulasi API RP 2A WSD lebih kecil atau pada sisi konservatif, kecuali pada kasus dengan beban momen keluar bidang. Pada kasus ini formulasi API RP 2A mengasumsikan bahwa kapasitas sambungan akibat momen keluar bidang sama dengan kapasitas sambungan sebidang. Asumsi ini tidak sesuai dengan hasil analisis metode elemen hingga dan berakibat hasil dari formulasi API RP 2A tidak konservatif dan perlu dikoreksi. Kesalahan rata-rata memang tidak terlalu besar, yaitu masih lebih kecil dari 20% dan masih jauh lebih kecil dari angka keamanan yang disyaratkan, yaitu $SF = 1,6$.

5.6 Analisis peningkatan kapasitas akibat grout

Berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga, dilakukan perhitungan peningkatan kapasitas akibat adanya grout untuk masing-masing model. Rangkuman peningkatan kapasitas sambungan tubular *chord* ganda setelah digrout dibandingkan dengan kapasitas sebelum digrout ditunjukkan pada **Tabel 6**. Hasil ini menunjukkan peningkatan kapasitas yang cukup besar dari aplikasi grout pada sambungan tubular *chord* ganda. Persentase peningkatan kapasitas terbesar ditunjukkan pada kasus beban aksial tekan.

5.7 Analisis parameter kapasitas sambungan tubular *chord* ganda digrout

Untuk bisa menunjukkan pengaruh parameter-parameter sambungan tubular yang berperan dalam kapasitas sambungan tubular *chord* ganda digrout, hasil-hasil analisis dipresentasikan dalam kurva-kurva berdasarkan parameter yang ingin ditinjau di bawah ini. Untuk presentasi, kapasitas gaya aksial dan momen di plot pada

Tabel 6. Peningkatan kapasitas sambungan tubular *chord* ganda akibat grout

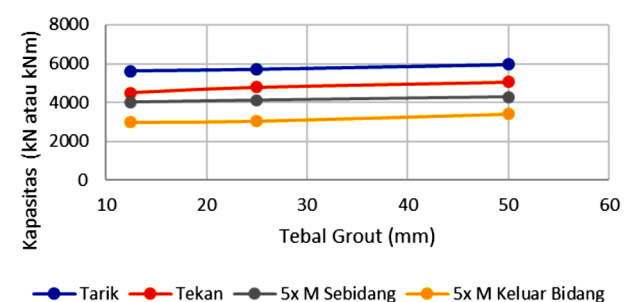
Model	Peningkatan Kapasitas			
	Tarik	Tekan	Momen Sebidang	Momen Keluar Bidang
	[%]	[%]	[%]	[%]
A1	60,91	108,93	50,03	81,59
A2	63,68	121,89	53,61	85,73
A3	71,16	134,62	59,67	106,92
B1	63,68	121,89	53,61	85,73
B2	65,20	127,27	60,74	90,58
B3	66,52	132,81	63,39	100,79
C1	22,18	52,69	29,54	37,63
C2	63,68	121,89	53,61	85,73
C3	83,47	292,93	69,72	158,59
D1	164,04	388,61	140,95	290,55
D2	63,68	121,89	53,61	85,73
D3	22,46	42,30	16,82	20,72

grafik yang sama dan skala momen dibuat 5x agar grafiknya lebih setara.

5.7.1 Parameter tebal grout

Model set A merupakan 3 model dengan ketebalan grout yang berbeda dan parameter lainnya konstan. Dipilih ketebalan grout merupakan kelipatan dari tebal *chord* luar yaitu Model A1 sampai Model A3 dengan tebal grout masing-masing $0,5T$, $1T$, dan $2T$. Kurva hubungan antara kapasitas sambungan tubular digrout sebagai fungsi tebal grout ditunjukkan pada **Gambar 17**.

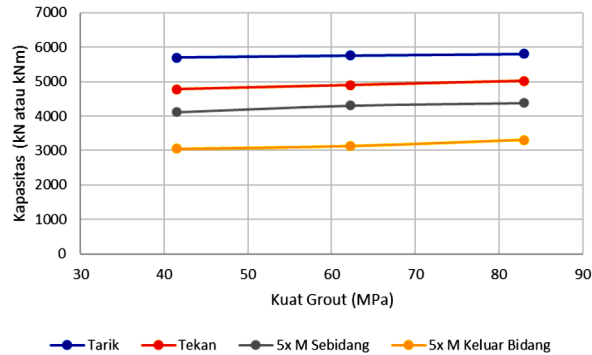
Dari **Gambar 17** dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya ketebalan grout bertambah pula kapasitas sambungan. Hal tersebut menunjukkan ketebalan grout memberikan pengaruh terhadap kapasitas pada sambungan tubular *chord* ganda digrout. Namun perubahan ketebalan grout tidak memberikan pengaruh yang begitu signifikan pada peningkatan kapasitas sambungan tubular. Hal ini sesuai dengan formulasi dalam peraturan API RP 2A WSD dan NORSOK N-004 yang tidak memperhitungkan pengaruh ketebalan grout.



Gambar 17. Kapasitas sambungan tubular digrout fungsi tebal grout

5.7.2 Parameter kuat material grout

Model set B merupakan 3 model dengan kekuatan material grout yang berbeda dan parameter lainnya konstan. Kurva hubungan antara kapasitas sambungan tubular digROUT sebagai fungsi kuat material grout ditunjukkan pada **Gambar 18**.



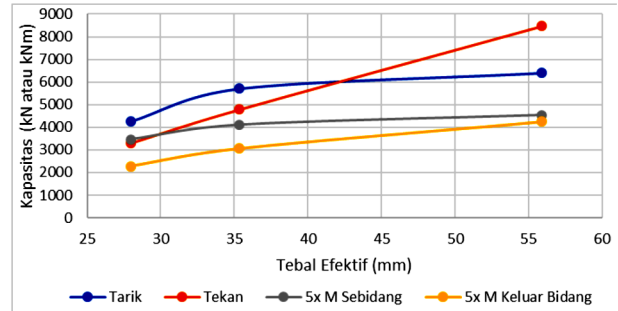
Gambar 18. Kapasitas sambungan tubular digROUT fungsi kuat material grout

Dari **Gambar 18** dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya kekuatan material grout bertambah pula persentase peningkatan kapasitas akibat grout. Hal tersebut menunjukkan kekuatan material grout memberikan pengaruh terhadap peningkatan kapasitas pada sambungan tubular *chord* ganda. Namun perubahan kekuatan material grout tidak memberikan pengaruh yang begitu signifikan pada peningkatan kapasitas sambungan tubular. Hal ini sesuai dengan formulasi dalam peraturan API RP 2A WSD dan NORSOK N-004 yang tidak memperhitungkan pengaruh kekuatan material grout.

5.7.3 Parameter tebal *chord* dalam

Model set C merupakan 3 model dengan ketebalan *chord* dalam yang berbeda dan parameter lainnya konstan. Dalam persamaan API RP 2A WSD dan NORSOK N-004 pengaruh ketebalan *chord* dalam diperhitungkan sebagai penambahan ketebalan efektif (T_{ef}) sesuai dengan **Persamaan 3**, sehingga yang menarik untuk ditampilkan adalah kapasitas sambungan tubular digROUT sebagai fungsi ketebalan efektif. Kurva hubungan antara kapasitas sambungan tubular digROUT sebagai fungsi ketebalan efektif dengan ketebalan *chord* luar konstan ditunjukkan pada **Gambar 19**.

Dari **Gambar 19** dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya ketebalan efektif (akibat bertambahnya ketebalan *chord* dalam) bertambah pula kapasitas sambungan tubular digROUT. Peningkatan kapasitas gaya tekan menunjukkan gradien konstan yang menunjukkan kekuatan tekan sangat baik memanfaatkan gabungan *chord* luar dan dalam. Sementara peningkatan kapasitas untuk gaya aksial tarik dan momen terlihat naik lalu melandai dan cenderung konstan pada ketebalan efektif yang meningkat. Hal ini menunjukkan ada keterbatasan peningkatan kapasitas karena *chord* luar gagal bekerja

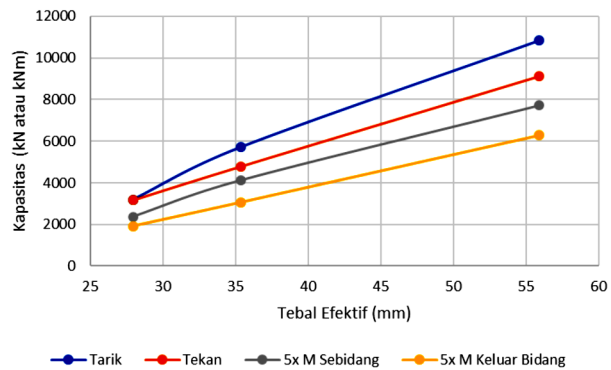


Gambar 19. Kapasitas sambungan fungsi ketebalan efektif dengan ketebalan *chord* luar konstan

sebagai satu kesatuan dengan *chord* dalam. Pada ketebalan efektif yang tinggi, peningkatan kekuatan dibatasi oleh kapasitas *chord* luar. Hal ini sesuai dengan formulasi dalam peraturan API RP 2A WSD dan NORSOK N-004 yang memperhitungkan pengaruh ketebalan *chord* luar dan ketebalan efektif dalam dua set persamaan berbeda. Harus dicek keduanya dan harus dipakai nilai kapasitas minimum antara hasil keduanya.

5.7.4 Parameter tebal *chord* luar

Model set D merupakan 3 model dengan ketebalan *chord* luar yang berbeda dan parameter lainnya konstan. Mengikuti pembahasan sebelumnya, pengaruh ketebalan *chord* luar juga dibahas dengan formulasi ketebalan efektif. Kurva hubungan antara kapasitas sambungan tubular digROUT sebagai fungsi ketebalan efektif dengan ketebalan *chord* dalam konstan ditunjukkan pada **Gambar 20**.



Gambar 20. Kapasitas sambungan fungsi ketebalan efektif dengan ketebalan *chord* dalam konstan

Dari **Gambar 20** dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya ketebalan efektif dan ketebalan *chord* dalam tetap, peningkatan kapasitas naik monoton. Berbeda dengan hasil menaikkan ketebalan *chord* dalam saja, pada kasus ini kenaikan kapasitas sambungan tidak melandai dan menjadi konstan pada ketebalan efektif yang besar. Hal ini berbeda karena pada kasus ini penambahan ketebalan efektif dibuat dengan penambahan ketebalan *chord* luar sehingga kegagalan *chord* luar tidak menjadi pembatas kenaikan

kapasitas. Gradien kenaikan kapasitas terlihat menurun menunjukkan manfaat komposit antara *chord* luar dan *chord* dalam menurun untuk kasus *chord* luar jauh lebih tebal dari *chord* dalam. Tetapi dari grafik, terlihat kapasitas hampir merupakan fungsi linier terhadap ketebalan efektif. Hal ini cukup sesuai dengan formulasi dalam peraturan API RP 2A WSD dan NORSOK N-004 yang memperhitungkan pengaruh ketebalan *chord* luar terhadap kapasitas sebagai fungsi linier.

6. Kesimpulan

Dalam penelitian ini dilakukan kajian terhadap kapasitas sambungan tubular tanpa dan digROUT dengan metode elemen hingga dan hasilnya juga dipakai untuk mengevaluasi formulasi kapasitas sambungan tubular menurut peraturan API RP 2A WSD. Untuk penelitian ini sistem sambungan tubular dan metode grout dibatasi pada sistem dengan *chord* ganda (*double skin tubular joint*). Berdasarkan hasil analisis dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Untuk kasus sambungan tanpa grout, hasil-hasil metode elemen hingga dan hasil-hasil dengan formulasi API RP 2A WSD 2007 memberikan perbedaan rata-rata lebih kecil dari 30%. Umumnya hasil formulasi API ada pada sisi konservatif kecuali pada satu kasus yang tidak memenuhi batas validitas persamaan API. Hasil ini masih bisa diterima karena hasil formulasi API ada pada sisi konservatif dan rumus empiris perlu dibuat dengan bentuk tidak terlalu kompleks.
2. Untuk kasus sambungan tubular *chord* ganda digROUT, hasil-hasil metode elemen hingga dan hasil-hasil dengan formulasi API RP 2A WSD 2007 memberikan perbedaan rata-rata lebih kecil dari 20% kecuali untuk kasus gaya aksial tarik yang menunjukkan perbedaan rata-rata hampir 40%. Umumnya hasil formulasi API ada pada sisi konservatif kecuali pada kasus momen keluar bidang. Untuk beban momen sebidang dan keluar bidang API RP2A WSD 2007 memakai persamaan yang sama sementara metode elemen hingga menunjukkan kapasitas menahan momen keluar bidang lebih kecil daripada kapasitas menahan momen sebidang. Akibatnya hasil API tidak ada pada posisi konservatif untuk beban momen keluar bidang. Pada umumnya hasil ini masih bisa diterima karena hasil formulasi API ada pada sisi konservatif dan rumus empiris perlu dibuat dengan bentuk tidak terlalu kompleks. Khusus untuk kasus momen keluar bidang, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mencegah adanya hasil formulasi API pada sisi tidak konservatif.
3. Semua model sambungan *chord* ganda digROUT dan semua tipe pembebanan menunjukkan grout dapat meningkatkan kapasitas sambungan tubular. Kenaikan kapasitas minimum yang diamati adalah sekitar 20%, sementara yang terbesar bisa lebih dari 100%. Persentase peningkatan kapasitas terbesar ditunjukkan pada kasus beban aksial tekan.
4. Perubahan ketebalan grout dan kuat grout memberikan pengaruh yang tidak begitu signifikan terhadap peningkatan kapasitas sambungan tubular *chord* ganda

digROUT. Hasil ini sesuai dengan peraturan API dan NORSOK yang tidak menunjukkan pengaruh tebal grout dan kuat material grout dalam formulasi kapasitas sambungan tubular yang digROUT.

5. Penambahan ketebalan efektif dengan penambahan ketebalan *chord* dalam saja memberikan penambahan kapasitas yang cukup signifikan terhadap kapasitas sambungan tubular digROUT. Kenaikan kapasitas melandai dan menjadi konstan pada saat kegagalan sambungan ditentukan oleh kegagalan *chord* luar sehingga penambahan ketebalan *chord* dalam tidak bisa meningkatkan kapasitas lagi. Hal ini sesuai dengan perumusan peraturan API RP 2A WSD dan NORSOK N-004 yang mengharuskan pengecekan kapasitas berdasarkan dua persamaan berbeda; yang pertama berdasarkan ketebalan *chord* luar dan yang kedua berdasarkan ketebalan *chord* efektif (gabungan).
6. Penambahan ketebalan efektif dengan penambahan ketebalan *chord* luar saja memberikan penambahan kapasitas yang cukup signifikan terhadap kapasitas sambungan tubular digROUT. Gradien kenaikan kapasitas sedikit menurun dengan bertambahnya ketebalan *chord* luar dan kapasitas hampir merupakan fungsi linier terhadap ketebalan efektif. Hal ini cukup sesuai dengan formulasi dalam peraturan API RP 2A WSD.

Daftar Pustaka

- ABAQUS (2011), "ABAQUS/CAE 6.11 User's Manual". Online Documentation Help: Dassault Systèmes.
- API RP 2A-WSD (2007), *API Recommended Practice for Planning, Designing, and Construction Fixed Offshore Platform Working Stress Design*, American Petroleum Institute (API), USA.
- Gomes, N. V., L.R.O. de Lima, P.C.G. da S. Vellasco, A.T. da Silva, M.C. Rodrigues, L.F. Costa-Neves, (2019), "Experimental and numerical investigation of SHS truss T-joints reinforced with sidewall plates", *J. of Thin-Walled Structures*, 145: 106404
- Melek, P. G., Hussein, M. and Gaawan, S. (2017), "Confining T-joints by adding two outer hollow ring flanges welded to additional hollow circular pipe", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(10): 783-801
- Norsok Standard N-004 (Rev. October 2004) : *Design of steel structures*, Standard Norway.
- Pecknold, D. A, Park, J.B., and Koppenhoefer, K.C., (2001), "Ultimate Strength of Gap K Tubular Joint with Chord Preloads", in *Proceedings of OMAE'01 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Shen, W. and Choo, Y. S. (2012), "Stress Factor for a Tubular T-joint with Grouted Chord", *J. Engineering Structure*, 35:37-47

- Shengzhi, S., Yongbo, S., (2011), "Static Strength of Tubular T-joint with Reinforced Chord Under In-plane Bending Load", *The Open Ocean Engineering Journal*, 4: 65-70
- Shubin, H.E., Yongbo, S., and Hongyan, Z., (2013), "Static Strength of Circular Tubular T-joints with Inner Doubler Plate Reinforcement Subjected to Axial Compression", *The Open Ocean Engineering Journal*. 6: 1-7
- Suarjana, M., Kurnia, M.,(2013), "Pengujian Perumusan Code API (American Petroleum Institute) untuk Joint Baja Tubular tidak DigROUT dan DigROUT dengan Metoda Elemen Hingga", *Jurnal Teknik Sipil*, Institut Teknologi Bandung, 20(3): 195-206
- Swensson, K. D., Yura J. A., (1987), *Ultimate Strength of Double-Tee Tubular Joint: Interaction Effects*, PMFSEL Report No. 87-9, The University of Texas, Austin, USA.
- Thorenfeldt, E. Tomaszewicz, A. dan Jensen J. J., (1987), "Mechanical properties of high-strength concrete and application in design," *Proceedings of Symposium on Utilization of High-Strength Concrete*, Tapir, Trondheim, Norway.
- Van der Vegte, G.J., Makino, Y., and Wardeiner, J., (2002), "The Effect of Chord Pre-load on The Static Strength of Uniplanar Tubular K-Joints", *Proceedings of The Twelfth Offshore and Polar Engineering Conference*. Kitakyushu, Jepang.
- Wei, S. (2011), *Behaviour of Grout Infilled Steel Tubular Members And Joints*, Ph. D. Thesis, National University of Singapore, Singapore.
- Yura, J. A., Zettlemyer, N. A., and Edwards, I. F. (1980). "Ultimate Capacity Equations for Tubular Joints". Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA.